

スパー型浮体式洋上風車の最適化に関する研究

Optimization of SPAR Type Floating Wind Turbine

鈴木英之¹・芦田哲郎²・榎本一夫³・矢後清和⁴・段烽軍⁵

Hideyuki SUZUKI, Tetsuro ASHIDA, Kazuo ENOMOTO, Kiyokazu YAGO and Fengjun DUAN

¹工博 東京大学大学院教授 工学系研究科 環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

³東京大学大学院 工学系研究科 環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

⁴正会員 海上技術安全研究所 海洋開発研究領域 (〒181-0004 東京都三鷹市新川6-38-1)

⁵理博 東京大学大学院助手 工学系研究科 環境海洋工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

This paper presents optimization of the SPAR-type floating structure for offshore wind turbine. Water depth of sea around Japan becomes steeply deeper with the distance from the coast. Different from Europe where bottom mounted wind turbines are installed in the shallow water, floating wind turbine is necessary for wind energy development in Japan. Total amount of energy expected on the sea around Japan is far larger than that of expected on land. The main challenge in developing the floating wind turbine is cost reduction. The authors have been studying and developing the SPAR-type wind turbine. This paper presents improvement and verification test of the 3-D response analysis program of the SPAR-type wind turbine first. Then optimization of the floating structure using the program is presented. Objective function is weight which is a dominant parameter of the cost of steel structure. Length of submerged column is changed and optimum configuration is selected.

From the research some conclusions were obtained, 1) accuracy of the analysis program was improved and verified through wave and wind tank experiment, 2) fin which is necessary to improve dynamic response of the wind turbine is not necessarily important for long column case, and 3) cost of floating structure was dramatically reduced by increasing the maximum allowable inclination limit.

Key Words : Spar-type Floating Structure, Wind Turbine, Optimization, 3-D Response Analysis

1. はじめに

環境負荷が小さく採算性の期待できるエネルギーとして風力エネルギーが注目されている。風力エネルギーがわが国のエネルギー事情において意味のあるエネルギー源となるためには陸上のみならず洋上における風力エネルギーを活用する必要がある。わが国は3万kmもの長い海岸線と世界6位の約447万km²の排他的経済水域 (EEZ) を有し、洋上に莫大な風力エネルギーを有している。一方、わが国の海底地形は、岸から離れるに従って急速に水深が増すため、欧州で開発が進んでいる着底式の洋上風力発電システムは不向きである。著者らは、着底式に代わり浮体式の洋上風車に着目し、浮体の中でもシンプルな構造で最も安価に建設可能であると考えられるスパー型浮体に焦点をあて、強度、機能性、経済性の面で優れた形状を提案することを目的として検討を進めてきた。¹⁾

4)

本研究では動揺特性に優れたスパー型浮体式風車に関

して、これまでに検討してきた技術的成立性に加えて、構造重量を最小化する最適化を行ない、経済性の高い形態を求める検討を行った。

2. 最適化の検討方針

スパー型風車の設置が想定される海域の代表的海象条件を定め、この環境条件下において強度要件、機能性要件を満たす条件下でコストに直接関係する構造重量を最小化する最適化を行なった。

スパー型浮体は図-1に示すように、浮力体の浮力とバラストによって作られる復原モーメントにより稼働時の静的傾斜を押さえるとともに、浮力体を没水させ水線面積を小さくして波力の小さい形状とするものである。さらにフィンを取り付けることにより、付加質量による回転慣性を増してHeave, Pitch運動の長周期化を図り、

共振回避を行うことで運動特性を改善している。また、水中コラムなど浮力体以外の没水部分については、注水することで余分な補強を省略する構造としている。さらに、合成繊維ロープと把駐力の大きなVertical Loading Anchorの組み合わせにより、効率の高い浮体- 係留系を構成するものである⁴⁾。

スパー型風車の応答特性がどのように形作られているかを見ると、最適化の見通しとして、コラム長さを増すことにより復原性能を変えることなく、浮力体を小さくし、バラストを軽減することが可能と考えられる。一方、コラムを長くすることにより、回転慣性も増やすことができるため、フィン小型化できる可能性もある。このような観点から、想定海象条件下において暴風時のタワー基部応力が160MPa以下という強度要件と、稼働時に静的傾斜と動的傾斜を足した最大傾斜が10°以下という機能性要件を満足するとの条件の下で、浮体重量、バラストを最小化する検討を行ない、最適な形状を求めた。具体的には没水部コラム長さをパラメータとして、各長さにおいて最も重量の軽い形状を求め、その傾向を求めた。さらに、機能性要件を緩めることによるコストへの影響を検討した。

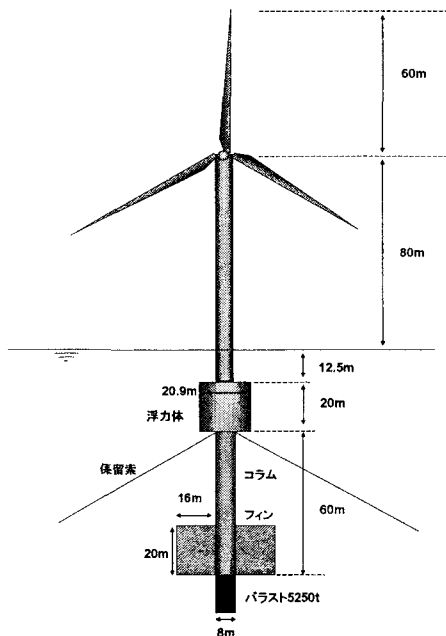


図-1 5MWスパー型浮体式風車の概念図

3. 3次元応答解析法の改良

(1) 3次元応答解析法

著者らが開発してきた3次元応答解析法^{1,2)}はモリソン式に基づいた、軽いコードであり最適化の計算には向いている。本解析法は、スパー型浮体式洋上風車の運動方程式を定式化した上で、非線形外力については平衡点回りで線形化し、これを定常成分と動的成分にわけて解く手法を用いている。作用する外力としては重力、浮力、

係留力、波浪強制力(Froude-Krylov力とDiffraction力)、風抗力、波浪漂流力、運動減衰力を考慮し、慣性力には風車の回転に伴うジャイロ効果も加味している。また、このように複雑な外力が作用しているため、運動方程式はHamiltonの原理から導出した。本研究では流体力係数の精度を向上することで、解析法の精度を向上させた⁵⁾。

(2) 精度検証実験

検証実験では、実機と動力学的に相似な実験模型を製作し、波、風、潮流を同時に発生できる(独)海上技術安全研究所の変動風水洞を用いて実験を行い、計算結果と比較する方法で精度を確認した。実験は図-2に示すように1/100スケールの浮体模型に5MW風車の直径120cmの模型を製作し搭載した。さらに水槽底から、ワイヤーとバネ定数1.91kgf/mのバネによりトート係留を模した係留を行った。図-3に実験模型と計測装置の配置を示す。実験模型の重量はアクリル製で、4444gのバラストを含めて11772gである。

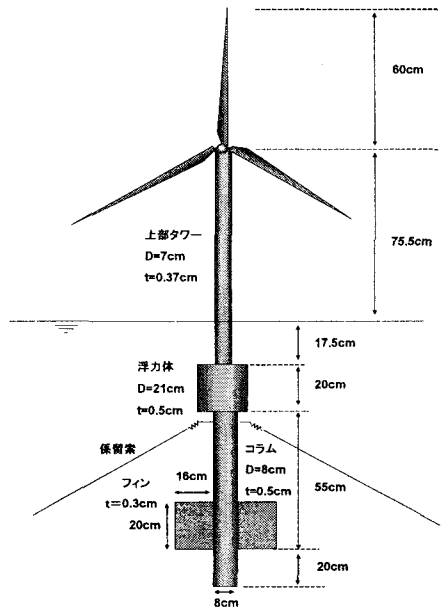


図-2 スパー型浮体式風車の実験模型

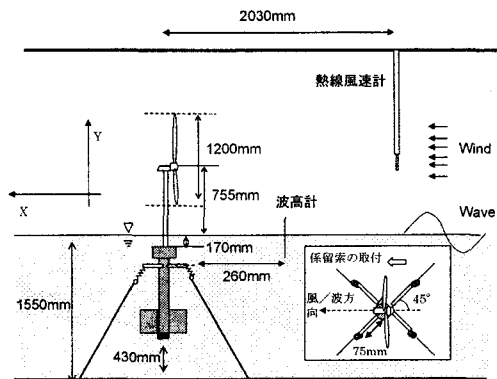


図-3 検証実験の模型・計測の設置状況

a) 風車単独試験結果

実験模型は基本的には実機と動力学的に相似であるが、

風車に関しては、動力学的相似則を満たすことは難しく、模型に搭載した5MW風車の模型に実際に作用する風抗力を実験から計測し、応答計算ではこの値を用いて計算した。図-4に風車の稼動状態ごとの抗力と風速の関係を示す。

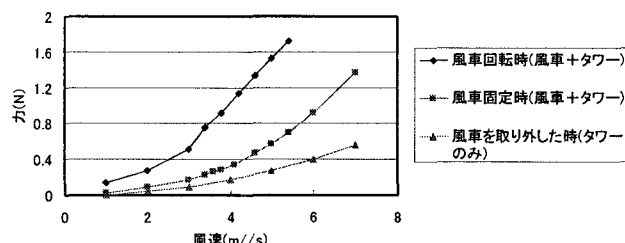


図-4 風車の抗力-風速関係

実験を整理した結果、風抗力係数 C_d と風速 V (m/s)の関係が次のように得られた。

風車回転時 ($3.4 \leq V \leq 4.6$)

$$C_d = -0.0048V + 0.0985 \quad (1)$$

風車固定時 ($4.6 < V$)

$$C_d = 0.0029V + 0.0038 \quad (2)$$

b) 波浪中応答実験結果

実験模型に規則波を加え6自由度の応答を計測した。実験条件を表-1に示す。波高4.0cmの場合についてSurgeとHeaveの周波数応答関数を図-5に示す。実線が計算結果を、シンボル付きの線が模型上の複数点で計測された値を示す。計算結果と実験結果はよく一致しており、3次元応答解析法の高い精度が検証された。

c) 風波共存場実験結果

実験模型に規則波と風を加え6自由度の応答を計測した。実験条件を表-2に示す。波高2.0cm、風速4.6m/sの場合について、SurgeとHeaveの周波数応答関数を図-6に示す。実線が計算を、シンボル付きの線が複数点での計測結果を示す。実験結果と計算結果は1.5sec以下において一致度は良い。Heaveに関しては、実験模型の固有周期2.6sec付近では計算結果のほうが大きくなったが、これは浮体の運動に伴う風車抗力の変動や、風によって波が乱されるなどの効果により精度が低下したと考えられる。想定海域における波の有義波周期9.8secに相当する0.98sec付近では、計算結果と実験結果はよく一致している。

4. スーパー型浮体式洋上風車の浮体形状の最適化

本研究では、精度を確認した3次元応答解析法を用いて、想定海域において強度要件、機能性要件を満たし、

これまでに検討した浮体を初期モデル²⁾として、最適化を行った結果と比較を行った。検討に用いた風車設置海域の自然環境条件を表-3に示す。

表-1 波浪中応答実験条件

波高(cm)	1.0, 2.0, 4.0
波周期(sec)	0.5 ~ 2.0sec, 0.1sec刻み

表-2 波風共存場中応答実験条件

風車条件	風車回転, 風車固定
波高(cm)	1.0, 2.0
波周期(sec)	0.5 ~ 2.0sec, 0.1sec刻み
風速(m/s)	3.6, 4.1, 4.6

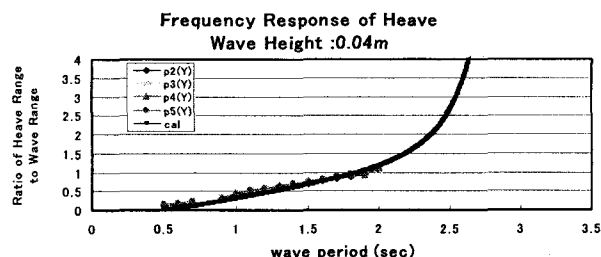
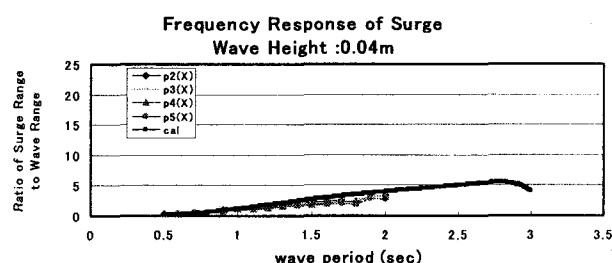


図-5 波浪中における Heave と Surge の周波数応答

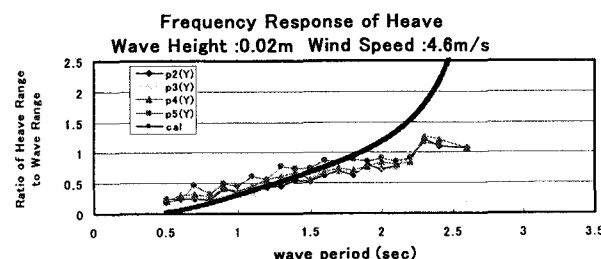
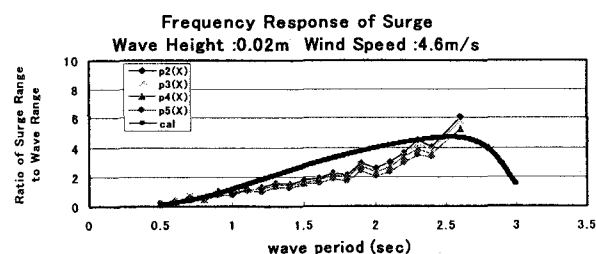


図-6 波風共存場中における Heave と Surge の周波数応答

表-3 最適化検討のための自然環境条件

	波	風
常用時	再現期間2年 有義波高6.8m 有義波周期9.8sec	カットアウト25m/s 定格14m/s
暴風時	再現期間100年 有義波高12.5m 有義波周期15.0sec	平均50m/s 最大80m/s

表-4 強度と機能性に関するクライテリア

強度要件	タワー基部応力<160Mpa
機能性要件	定常傾斜角+動的傾斜角の有義値<10°

強度要件は破壊モードを降伏と座屈とし、静的外力に対して最大応力が発生する上部タワー基部に着目して、ここに発生する最大応力が160Mpa以下であることとした。機能性要件については、風軸に対する風車面の傾斜が10°を超えると発電効率が低下するため、定常傾斜角と動的傾斜角の有義値の和が10°以内となることとした。最適化のクライテリアを表-4に示す。

最適化で用いる統計値は、波スペクトルについては次式で与えられるISSCスペクトルを用いた。

$$S(\omega) = \frac{0.11}{2\pi} H_v^2 T_v \left(T_v \frac{\omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 / \left(T_v \omega / 2\pi \right)^4 \right\} \quad (3)$$

ここに、 H_v は目視波高、 T_v は目視波周期である。浮体応答の統計値は、浮体の周波数応答関数 $H(\omega)$ とISSCスペクトル $S(\omega)$ から次式より m_0 を求め、有義値は $1.416\sqrt{2m_0}$ 、1000波最大値は $2.642\sqrt{2m_0}$ と評価した。

$$m_0 = \int_0^{\infty} H(\omega)^2 S(\omega) d\omega \quad (4)$$

(1) 初期モデル

本研究では、著者らにより提案された図-1のモデル^{1,2)}をスパー型浮体式洋上風車の初期モデルとした。本モデルは、最大傾斜が3.7°というより厳しい条件を満足する風車となっている。この風車は5MW風車、浮体構造2082t、バラスト5250t、係留索600m×8条、Vertical Loading Anchor8基からなり、コストについては5MW風車50400万円、浮体構造41700万円、バラスト1600万円、係留と設置17900万円と算定した⁵⁾。

(2) 最適化

スパー型浮体式洋上風車は、コラムの長さを長くすることにより、復原性能を変えることなく、浮力体を小さくし、バラストを軽減することができる。また、コラムを長くすることにより、回転慣性も増やすことができる

ため、フィン小型化できる可能性もある。最適化の方針は次のように整理される。

- 1) コラムの長さを増すことにより浮体の重心を低くし、浮体の静的安定性を高める。
- 2) 動的応答の改善のために付けたフィンの大さを縮小する。
- 3) 1)により浮体の安定性を高めた結果、バラスト重量を軽減化する。
- 4) バラスト重量の軽減により、浮体に必要な浮力が小さくなり、浮力体を小型にする。

本研究では、コラムの長さを50m、60m、80m、90m、95m、100mと変化させ、各コラムの長さにおいて、クライテリアを満たし、かつコストの最も小さくなるスパー型浮体式洋上風車の形状を、浮力体サイズ、フィンのサイズ、バラスト重量を種々変化させて求めた。

コラムの長さが60mの場合について、フィンの高さ、フィンの長さを5mずつ、バラスト重量を500tずつ変化させたときの、上部タワー基部に生じる最大応力、風車稼動時における定常傾斜角、動的傾斜角の有義値、浮体コストをそれぞれ図-7～図-10に示す。

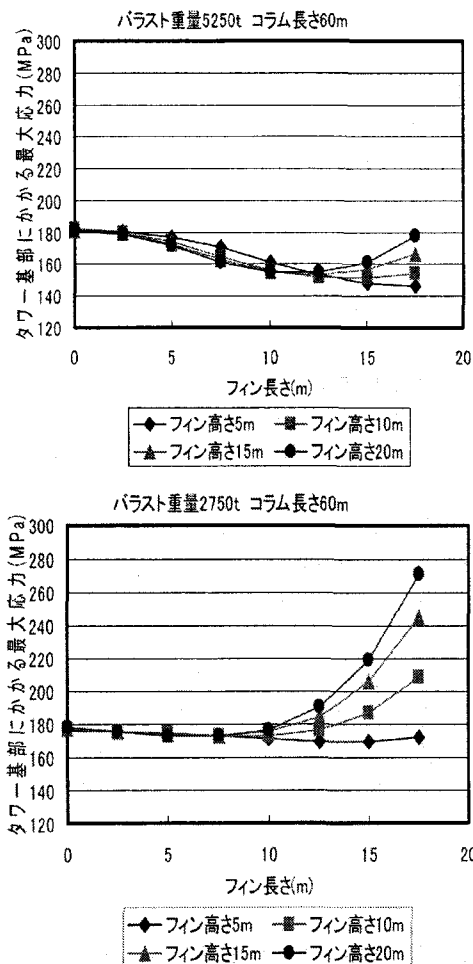


図-7 内力に対するバラストおよびフィンの大きさの影響

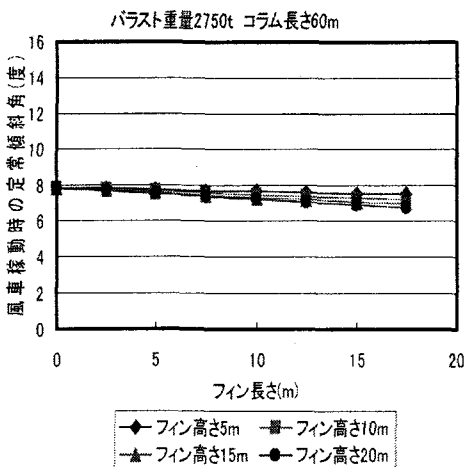
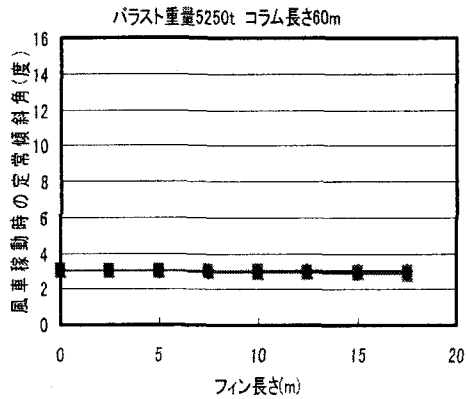


図-8 静的傾斜に対するバラストおよびフィンの大
きさの影響

図-7からバラスト重量が5250 tと大きな場合には、フィンの面積が大きくなるにしたがって最大応力は低下するが、面積が必要以上に大きくなると最大応力は逆に増加することが分かる。バラスト重量が2750 tと小さな場合は、フィン最大内力を増加させている。

図-8からフィンは基本的に静的傾斜には影響せず、バラスト重量が小さいときにのみ、フィンが大きくなるとフィンの重量増加により静的傾斜を低下させる効果があるが、その効果は小さいことが分かる。

図-9からは、バラスト重量が大きな場合には、フィンの面積が大きくなるにしたがって動的傾斜振幅は低下するが、バラスト重量が小さな場合には、フィン面積とともに動的傾斜振幅はいったん減少するものの、面積が必要以上に大きくなると逆に増加することが分かる。

定常傾斜角と動的傾斜角振幅の有義値を足した傾斜の最大値はバラスト重量が大きな場合には 5° 以下となり、強度要件が支配的条件となっていることが分かる。一方、バラスト重量が小さな場合は、 $8\sim 9^{\circ}$ となり、機能性要件の限界に近づくことが分かる。いずれの場合もフィンが大きくなると最大傾斜は小さくなることがわかる。

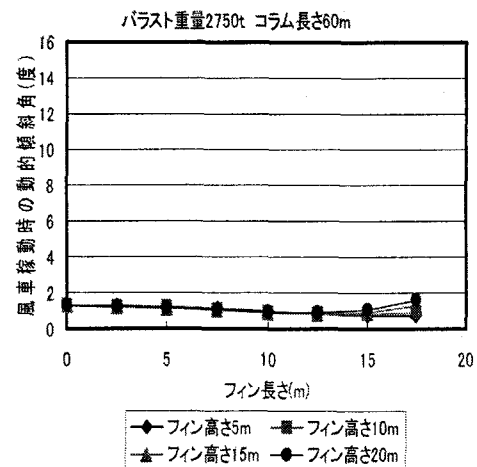
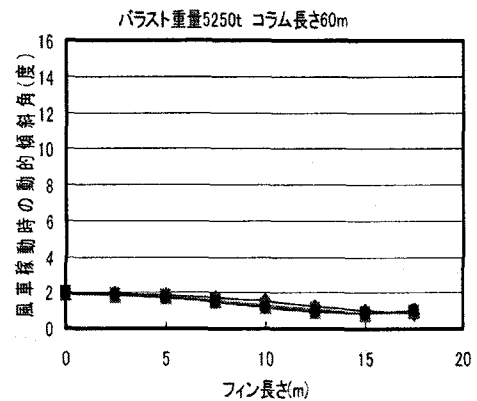


図-9 動的傾斜に対するバラストおよびフィンの大
きさの影響

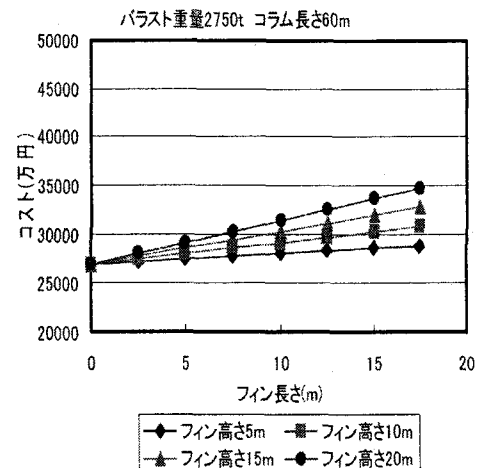


図-10 コストに対するバラストおよびフィンの大
きさの影響

図-10からは、フィンの面積が増すにしたがって浮体のコストは単調に増加することが分かる。同様の検討をコラム長さを変化させて検討し、強度要件、機能性要件を満足し、かつコストの最も低いものを抽出した。各コラム長さにおいて得られた最適形状を図-11に示す。

その結果、コラム長さを80m以上にすると動的応答を抑えるためにフィンをつける必要がなくなることがわかった。また、コストについては図-12に示すように、コラム長さを長くすることで低下する傾向にあるが、その効果は小さい。一方、最も低コストの浮体と初期モデルを比較すると、コストは41700万円から28329万円に32%削減することができた。機能性要件を緩和することでコストが大幅に下がることがわかった。

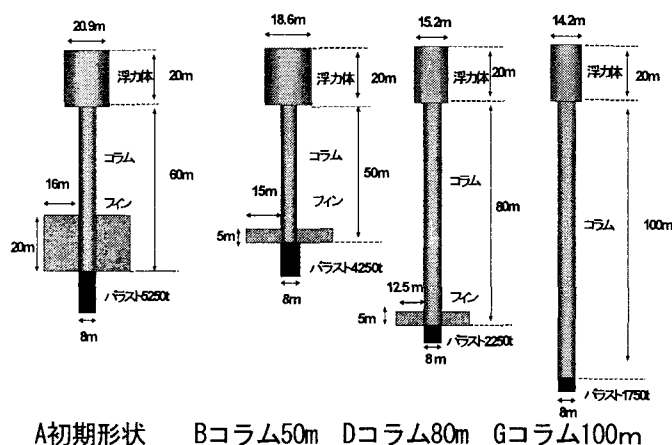


図-11 各コラム長さにおける最適形状

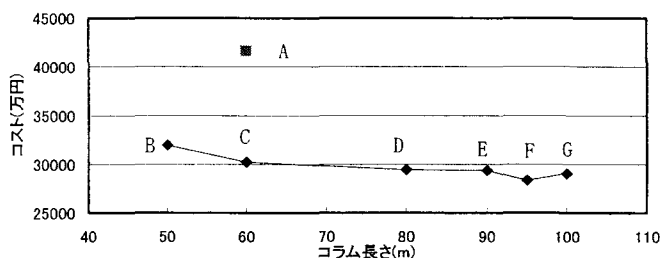


図-12 各コラム長さにおける最適形状のコスト

5. 結論

本研究より次の結論を得た。

- 1) 浮体の流体力係数に考察を加えることで、3次元応答解法の精度を高め、水槽実験により確認した。
- 2) スーパー型浮体式洋上風車の形状についてはコラム長さを長くすることにより、コストを低減できる

- 3) 機能性要件を緩和することにより、大幅にコストを低減できる。
- 4) 最適化した浮体について、係留、設置コストを考慮すると5MWスーパー型浮体式風車のkW当たりのコストは20万円/kWとなる。

最後に、フィンについては風車に作用する風力のアンバランスによる回頭モーメントに抗して回頭量を低減する効果があり、この観点から無くしてしまうことは避ける必要がある。クライテリアに関しては、最大傾斜が風車の効率が低下を始める 10° としたが、傾斜以外に、タワー上部のナセルにおける速度や加速度が風車機構の強度に関連して重要な設計要件となると考えられ、今後の検討課題である。

謝辞

本研究は平成16年度「浮体式洋上風力発電による輸送用代替燃料創出に資する研究」として（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構の支援を受けて実施したものである。

参考文献

- 1) 鈴木英之：スーパー型洋上風車の動揺最適化，洋上風力発電フォーラム，2004。
- 2) 鈴木英之，橋本崇史，関田欣治：スーパー型洋上風車の動揺特性改善に関する研究，土木学会海洋開発講演会，2004，pp. 911-916。
- 3) 鈴木英之，澤井貴之，岡徳昭，矢後清和：スーパー型浮体による洋上風力発電システムに関する検討，第25回風力エネルギー利用シンポジウム，日本風力エネルギー協会，2003，pp. 252-255。
- 4) 関田欣治，鈴木英之：合成繊維ロープおよび新形式アンカーによるトート係留，日本造船学会秋季講演会，2004A-OS4-2。
- 5) 芦田哲郎：スーパー型浮体式洋上風車の最適化に関する検討，東京大学工学部システム創成学科環境・エネルギーコース平成16年度卒業論文，2004。